

Elektromagnetismens udforskning

H.C. Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen, der er beskrevet i udstillingen *Det nysgerrige menneske, åbnede et helt nyt felt inden for fysikken, som blev udforsket både eksperimentelt og teoretisk. Her kan man læse om, at der gik over et halvt århundrede, inden fysikerne for alvor forstod fænomenet.*

Straks efter at Ørsted i sommeren 1820 havde gjort sin store opdagelse, skrev han rundt til et halvt hundrede lærde kolleger i Europa for at fortælle dem om, hvordan elektriciteten i en ledning kunne påvirke en magnetnål. (Se “Elektromagnetismen 200 år”, *Stenomusen* 81, 1-5.)

Ud over selve forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme var det mest overraskende ved opdagelsen, at de magnetiske kræfter stod vinkelret på ledningen. Dette lod nemlig til at være i direkte modstrid med de toneangivende franske fysikers forestilling om, at naturkræfter altid virker langs med forbindelseslinjen mellem de objekter, der

påvirker hinanden. Derfor modtog de nyheden med betydelig skepsis.

Heldigvis var Ørstedes forsøg let at eftergøre, og de måtte hurtigt erkende, at opdagelsen var god nok. Ja, nogle af dem undrede sig ligefrem over, at de ikke selv havde opdaget fænomenet for længst. Men nu satte de til gengæld gang i en intens udforskning af elektromagnetismen.

Ampère og elektrodynamikken

André-Marie Ampère var en af de forskere, som kastede sig over opgaven med størst ildhu. Han opdagede bl.a., at ikke bare ledningen, men også batteriet var magnetisk aktivt, hvilket førte ham til en forestilling om, at elektrisk strøm er noget, som løber gennem både ledningen og batteriet i et lukket kredsløb. Selvom det er selvindlysende for os i dag, var det en helt ny idé.

For at undersøge strømmen nærmere konstruerede Ampère et apparat med to parallelle ledere, hvoraf den ene sad fast, mens den anden kunne bevæge sig frit.

Artiklen er til dels baseret på H. Buhl, “Elektromagnetismen – opdagelse og udforskning”, *Aktuel Naturvidenskab*, 4-2020, 34-38.

Vil du vide mere, anbefales Ole Knudsens lille bog *Elektromagnetisme 1820-1900*, som er udgivet af Steno Museets Venner.



Bogen kan købes i Steno Museets butik for 60 kr. eller på smv.ebog.dk. Bogen kan også lånes på eReolen.

Det viste sig, at de to ledere tiltrak hinanden, når strømmen gik samme vej i dem, mens de frastødte hinanden, når strømmene var modsatrettede.

Blot to uger efter Ampère havde hørt om Ørstedes eksperiment, havde han således opdaget, at to strømførende ledere opførte sig, ligesom to magneter ville gøre i forhold til hinanden. Inden længe fremsatte han den dristige antagelse, at al magnetisme har sin oprindelse i elektriske strømme.

I de følgende år udviklede han en matematisk lov for kraften mellem to infinitesimale (dvs. uendeligt

små) strømelementer. Kraften viste sig at være proportional med strømstyrkerne samt at aftage med kvadraten på afstanden mellem strømelementerne. Den magnetiske kraft havde altså samme struktur som tyngdekraften og de elektriske kræfter. Gennem sin matematiske analyse af fænomenet var det lykkedes Ampère at genoprette den uorden, som Ørstedes opdagelse havde skabt i den

etablerede fysiks opfattelse af, at verden består af partikler, som påvirker hinanden med centrale kræfter.

Ampères ideer blev videreudviklet af en række fysikere, ikke mindst tyskeren Wilhelm Weber, som antog, at elektrisk strøm består af ladede partikler i bevægelse. Ad denne vej lykkedes det ham midt i 1800-tallet at forene Coulombs lov om kraften mellem ladninger og Ampères elektrodynamiske love i en og samme kraftlov. Mange fandt det tilfredsstillende, at Webers kraftlov nu kunne forklare alle elektriske og magnetiske fænomener, ligesom Newtons gravitationslov forklarede planeterne bevægelse.

De elektromagnetiske fænomener kunne imidlertid også forstås på en helt anden måde.

Faraday og den elektromagnetiske induktion

På den anden side af Den Engelske Kanal fulgte den selvlærte kemiker Michael Faraday interesseret med i udforskningen af elektromagnetismen. Han var – ligesom Ørsted – ikke begejstret for reduktionen af alle fænomener til centralkræfter.



I Steno Museets samling findes der en rekonstruktion af det apparat, som Ampère udviklede i 1820 for at vise, at to strømførende ledninger påvirker hinanden ligesom to magneter. Den ene leder sidder fast, mens den anden udgør en fint afbalanceret gyng, som kan give et stort udslag selv ved en ret lille strømstyrke. Foto: Hans Buhl.

Han var mere tiltrukket af Ørstedes ide om, at den elektromagnetiske virkning hovedsageligt var noget, som foregik rundt om ledningen. Antagelsen blev styrket af, at han i 1821 formåede at lave et apparat, hvor en magnet roterede omkring en strømførende leder. Dette princip er videreudviklet til vor tids allestedsnærværende elektromotorer, som står for omkring halvdelen af det globale elforbrug.

Af endnu større betydning var det, at Faraday i 1831 opdagede, at der bliver skabt en elektrisk strøm, når man ændrer magnetfeltet i en spole. Så hvor Ørsted havde vist, at strøm kan bevæge en magnet, havde Faraday vist det omvendte: at bevægelse af en magnet kan skabe strøm. Denne såkaldte elektromagnetiske induktion står i dag for over 90% af al strøm, som produceres på Jorden.

Elektromagnetiske felter

Faraday formulerede induktionsfænomenet således, at der i en ledning, som skærer en "magnetisk kurve", fremkaldes en kraft, som driver en strøm igennem ledningen. Med begrebet



Steno Museets samling rummer også en rekonstruktion af Faradays rotationsapparat fra 1821. Til venstre bevæger magneten i glasset med kviksølv sig rundt om ledningen, når der løber strøm igennem den. Til højre er det ledningen, der bevæger sig. Rotationsapparatet var verdens første elektromotor. Foto: Lise Balsby, AU Foto.

magnetisk kurve var han med til at etablere den forestilling om elektromagnetiske felter, som vi har i dag.

For Faraday var feltlinjerne i rummet omkring en magnet eller en strømførende ledning lige så reelle som magneten eller ledningen selv. Det sås bl.a. ved, at feltlinjerne kunne synliggøres med jernfilspåner på et stykke papir.

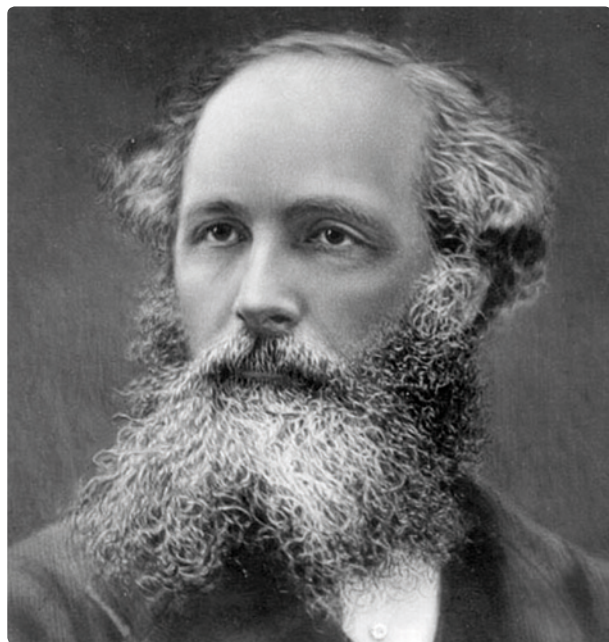
Ligesom Ørsted var Faraday ikke særlig god til matematik, så hans teori var rent billedlig. Men fra midten af 1800-tallet forsøgte flere britiske fysikere at udtrykke den matematisk. Ikke mindst skotten James Clerk Maxwell fik i løbet af et par årtier udviklet en sammenhængende feltteori for elektromagnetiske fænomener.

Maxwells ligninger og lysbølgerne

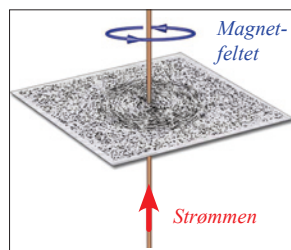
Maxwells teori tog udgangspunkt i den såkaldte æter, som var det hypotetiske, altgennemtrængende medium, alle kræfter mentes at udbrede sig i. Æteren blev tillagt nogle mekaniske egenskaber, som Maxwell oversatte til egenskaber for de elektriske og magnetiske felter. Det betød, at han ud

fra denne mekaniske model matematisk kunne beskrive de elektriske og magnetiske fænomener, som Ampère, Faraday og andre havde opdaget.

For at kunne gøre rede for isolatorers egenskaber var Maxwell nødt til at forestille sig, at æteren var elastisk. Det havde imidlertid den konsekvens, at der måtte kunne udbrede sig bølger



Skotten James Clerk Maxwell (1831-1879) er den nok mest betydningsfulde teoretiske fysiker i det 19. århundrede. Han arbejdede bl.a. med gasteori, termodynamik, statistisk mekanik og udviklede den endegyldige teori for elektromagnetismen. Den blev senere udgangspunkt for relativitetsteorien. Derfor sagde Einstein, at Maxwells forståelse af feltbegrebet er, "det dybeste og mest frugtbare, fysikken har oplevet siden Newtons tid."



De kontinentale fysikere var mest optaget af strømmen inde i ledningen. De britiske fysikere studerede i stedet det magnetiske felt rundt om ledningen. I slutningen af 1800-tallet lykkedes det at vise, at fænomenerne er to sider af samme sag. De ladede partikler, som strømmen består af, kan nemlig forstås som kilder til felterne.

igennem den. Når han indsatte de kendte elektromagnetiske konstanter i teorien, kom han til det overraskende resultat, at disse æterbølger udbredte sig med lysets hastighed. Derfor konkluderede han i 1865, at lys er bølgebevægelser i det samme medium, som er årsagen til de elektriske og magnetiske fænomener. Så ligesom Ørsted med sin opdagelse havde forenet elektricitet og magnetisme til ét samlet fænomen, havde Maxwell med sin teori et halvt århundrede senere forenet elektrodynamikken og optikken.

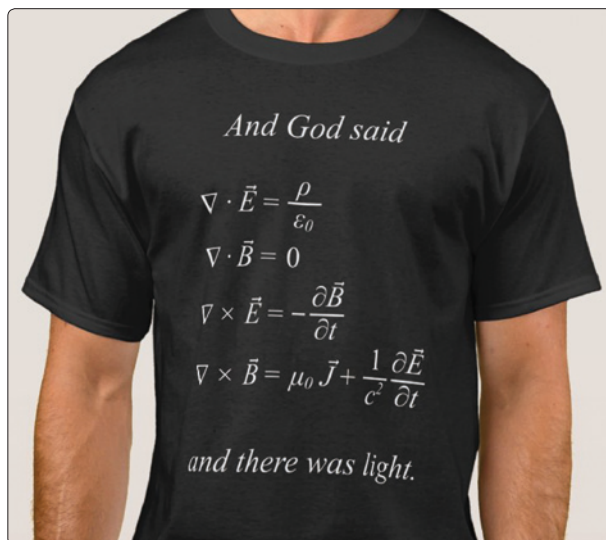
Oprindeligt opstillede Maxwell hele tyve ligninger til at beskrive de elektro-

magnetiske fænomener, bl.a. fordi han behandlede de tre rumlige koordinater hver for sig. Men i 1884 reducerede den engelske ingeniør og fysiker Oliver Heaviside ligningerne til de nu kendte fire differential-ligninger ved brug af vektornotation. Disse fire ligninger beskriver den relation, som elektriske ladninger i hvile og bevægelse har til elektriske og magnetiske felter.

Som nævnt opdagede Maxwell, at der blandt løsningerne til hans ligninger var nogle, der beskriver bølger, som udbreder sig med netop lyshastigheden. I flere årtier var disse elektromagnetiske bølger blot et teoretisk postulat, men i 1890'erne lykkedes det den tyske fysiker Heinrich Hertz at påvise de elektromagnetiske bølger eksperimentelt. Det bidrog til fysikernes udbredte accept af Maxwells ligninger. Påvisningen af de elektromagnetiske bølger førte også hurtigt til opfindelsen af den trådløse telegraf og senere radioen.

En lykkelig syntese

Maxwells bedrift ændrede dog ikke på, at fysikerne stod med to stærke og fuld-



De fire Maxwell-ligninger er ikke blot centrale for forståelsen af elektromagnetismen. De er også blandt de få ligninger, som er vidt udbredt på t-shirts og kaffekopper. Ligningerne forbinder de elektriske og magnetiske felter \mathbf{E} og \mathbf{B} med felternes kilder, dvs. ladningstætheder ρ og strøm-tætheder \mathbf{J} .

stændig forskellige teorier for det fænomen, som Ørsted havde opdaget i 1820: Webers teori, der indeholdt elektriske partikler, men ingen felter, og Maxwells teori, der indeholdt felter, men ingen elektriske partikler.

Dette tilsyneladende paradoks blev løst af den hollandske fysiker Hendrik A. Lorentz, der i 1890'erne udviklede elektronteori, som han kombinerede med Maxwells teori. Derved blev det muligt at opfatte ladede

partikler som kilder til felterne. Tilsvarende kunne felterne udøve en kraft på partiklerne. På denne måde kunne han integrere partikel- og felterperspektivet.

Takket være denne tilføjelse står Maxwells ligninger – der som nævnt var baseret på en mekanisk model af en “æter”, som vi siden har forladt ideen om, da den ikke kan påvises – stadig som den bedste teori for alskens elektromagnetiske fænomener.

Hans Buhl